UDC 621.315.211.3-462.3: (621.3.015.38+621.3.017.71

論文

49-B 48

高油圧パイプケーブルの強制冷却時の過渡温度上昇の解析と過負荷許容電流算法

電力中央研究所
東京電力株式会社

深 川 裕 正
神 永 建 二

1. ま え が き

近年における都市の電力需要は、経済の急激な発展に伴う工場設備投資の増大、ならびに都市の拡大、近代化やその再開発などの地域社会の開発に伴い、年々増加の一途をたどっているが、その供給線の大部分は地中送配電線に頼らざるを得ない状況にある。しかも公害、安全、美観に対する社会的要請ばかりでなく、用地問題の困難化に伴い、地中送電線の大容量化の要請はますます高まりつつあり、その対策として超高压化、超々高压化ならびに強制冷却の採用が考えられており、一部はすでに運転が開始されているところもある。

したがって、このような電力ケーブルの適切な送電容量の算出法の確立は、急を要する問題である。特に短時間の過負荷許容電流算出法の確立は、系統運用に柔軟性を持たせ、安定した送電を行なうにあたり重要なテーマである。

高油圧パイプケーブル(以下 POF ケーブルと略す)にあつては、

(1) 外傷に対して、きわめて堅牢であり、軟弱地盤、地震に対する信頼性が高い。

(2) 絶縁性能が安定しており、ジョイント間隔もかなり長くとれる。

(3) 充てん油の循環により手軽に強制冷却が可能である。

など数々の利点を有しており、今後広く実用化されていくものと考えられる。

しかるに強制冷却の研究は広く行なわれているが、それはすべて定常時の連続定格許容電流計算法の研究であり、短時間過負荷許容電流の算出法は強制冷却を行わない場合について簡単な手法があるにすぎず、系統運用ならびに設計上一つの大きなネックとさえなりつつある。

そこで筆者らは強制冷却時の過渡温度上昇を計算する方法を検討し、その結果から短時間過負荷許容電流を決定する方法を開発した。

2. 現行計算式とその問題点

POF ケーブルの短時間過負荷許容電流計算式としては特に確立されたものはなく、日本電線工業会規格 JCS-第 168 号 B にある他種ケーブルに定められた次式⁽¹⁾に準拠して算出されている。

$$I = \sqrt{\frac{T_6 - T_1}{nr_2 \{R_{int}(1 - e^{-\alpha_1 t_0}) + R_{out}(1 - e^{-\alpha_2 t_0})\}}} * \\ * + I_1^2 \frac{r_1}{r_2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、記号は下記を意味する。

I : 短時間過負荷許容電流 (A)

n : 線心数 (本)

I_1 : 連続定格電流または過負荷電流が流れる前の導体電流 (A)

T_6 : 短時間許容温度 (°C)

T_1 : 連続定格電流に対する許容温度または過負荷電流が流れる前の導体温度 (°C)

r_2 : 短時間許容温度での交流導体抵抗 (Ω/cm)

r_1 : T_1 °C における交流導体抵抗 (Ω/cm)

R_{int} : ケーブル部分の熱抵抗 (表面放散熱抵抗を含む) (°Ccm/W)

R_{out} : 管路及び土じょう部分の熱抵抗 (°Ccm/W)

Analysis of Transient Temperature Rise and Overload Current in Forced-Cooling Pipe-type Cables. By H. FUKAGAWA, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry) & K. KAMINAGA, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.).

深川裕正: 正員, 電力中央研究所技術第 1 研究所
神永建二: 正員, 東京電力株式会社地中線建設所

α_1 : ケーブル部分の温度上昇時定数の逆数 (1/hr)

0.6 と規定

α_2 : 管路及び土じょう部分の温度上昇時定数の逆数 (1/hr) 0.03 と規定

t_0 : 過負荷継続時間 (hr)

この式は OF ケーブルや SL ケーブルの対象として作られたもので、POF ケーブルに対しても適用可能かは十分検討されねばならないところである。特に α_1 , α_2 は 0.6, 0.03 と規定されているが、油が多量に充てんされている POF ケーブルにもこの式が適用可能かは十分検討されねばならない。

過負荷許容温度 T_0 については、上述の規格には何も言及されていないが、最近のすぐれた絶縁材料の開発から、イギリスでは 400kVOF ケーブルに対して、トラフ内布設部で 95°C、洞道内布設部で 100°C(ただし、1年に、1日数時間)を採用している。⁽²⁾ わが国では現在一般に 90~95°C が用いられているが、100°C の採用も時間の問題であろう。

一方、充てん油循環時の過負荷許容電流計算式は筆者らの調べた限り全くない。これは強制冷却下のケーブルの急激な負荷変化に伴う過渡的温度上昇の計算法が明らかにされていないことに由来するものである。強制冷却を行わないケーブルに対する過渡温度上昇の計算法は、すでに Neher 氏によって確立されており、⁽³⁾ 一般に利用されている。筆者らはこれを拡張し、強制冷却下のケーブルについて過渡温度上昇を計算する方程式を導き、計算機で解いて過負荷許容電流を求めることとした。以下にその詳細を記す。

3. 充てん油循環時の過渡温度上昇の解析

(3.1) 熱的等価回路の検討 高油圧パイプケーブルの過渡温度上昇の計算法は、ケーブルの半径方向の熱流のみを考えた第1図のような熱的等価回路でシミュレートして計算される。各記号は第1表のとおりである。同表には 275kV 及び 500kV の $3 \times 1,400 \text{ mm}^2$ のケーブルに関する諸数が示されているが、これらは主に次式から求められるものである。

$$\text{熱抵抗: } R_n = \frac{\rho_n \ln \frac{\gamma_n}{\gamma_{n-1}}}{2\pi} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{熱容量: } C_n = q_n \pi (\gamma_n^2 - \gamma_{n-1}^2) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ_n , q_n は各物質の固有熱抵抗 (°Cm/W), 熱容量 (J/°C cm) を示し、 γ_n , γ_{n-1} は各物質の外径、内径を意味する。また、表中放散熱抵抗については、油が流動する場合について十分確立された計算法がなく論議の多いところであるが、伝熱工学の理論を応用して、次式により計算することが、妥当なように思われる。⁽⁴⁾

(1) ケーブルコア～油間の放散熱抵抗 R_{d1}

Notaro 氏らの検討例もあるが、⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ これらの式は自然対流効果を考えておらず、そのため流量が大きくなると強制対流効果が熱伝達にきていて実験値とあ

第1図 POF ケーブルの熱的等価回路

Fig. 1. Thermal equivalent circuit of POF cable.

第1表 POF ケーブルに関する諸数値表 ($3 \times 1,400 \text{ mm}^2$)

Table 1. Thermal data of POF cables.

名 称	記 号	単 位	275 kV	500 kV	備 考
導体・導体バノダ・導体内油熱容量	C_c	J/C/cm	53.1	53.6	1 相 分
絶 縁 体	熱 容 量	C_i	93.4	123.9	"
	熱 抵 抗	R_i	53.3	72.6	"
補強層・スキッドワイヤ・しゃへい層	熱 容 量	C_s	3.5	9.3	"
	熱 抵 抗	R_s	0.6	1.3	"
放 散 熱 抵 抗 ($Q=4I/s$)	ケーブル～油間	R_{d1}	6.7	8.5	"
	油～パイプ間	R_{d2}	3.6	3.8	"
充 て ん 油 熱 容 量	C_o	J/C/cm	211.2	251.5	1 相 換 算
鋼 管 な ら び に 防 食 層	熱 容 量	C_p	63.7	129.6	"
	熱 抵 抗	R_p	11.5	4.7	"
土 じ ょ う	熱 容 量	C_g	400.0	155.0	直埋部 "
	熱 抵 抗	R_g	405.0	44.7	
鋼 管 表 面 熱 抵 抗	R_r	"	17.3	19.0	洞道部 "

まりよく一致せず、その適用には問題があり、次式で算出するほうが妥当なように思われる。

$$R_{d1} = \frac{1}{\pi \lambda N_{ueff}} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 λ は油の熱伝導率 ($W/^{\circ}Ccm$)、 N_{ueff} は実効 Nusselt 数で、次式で表わされる。

$$N_{ueff} = \left(\frac{N_{u1}}{m} + N_{u2} \right) n \dots \dots \dots (5)$$

N_{u1} は流体の自然対流熱伝達に対する Nusselt 数

N_{u2} は流体の強制対流熱伝達に対する Nusselt 数を意味し、Prandtl 数 Pr 、Grashof 数 Gr 、Reynolds 数 Re を用いて、それぞれ次式のように表わされる。

$$N_{u1} = 0.47 (Gr Pr)^{1/4} \dots \dots \dots (6)$$

$$N_{u2} = c Re^d 1.11 Pr^{0.31} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 c, d : 定数

なお、 Re 数には乱流の場合、流体力学的等価直径を、 Gr 数には流体の高さを用いる必要があるが、パイプ内部のケーブルコアの配置も各種考えられるので実用上、近似的にケーブルコア外径を入れても、熱抵抗に大きな差異は生じないと思われる。

また、 m は定数で 4 に近い値である。 n は形状係数で、ケーブルコアの全表面積に対する流体のぬれ面積の比で与えられ、俵積み上層ケーブルでは 1/1.2 程度と計算される。

500kV, 1,400mm² の POF ケーブルについて計算した結果は第 2 図のとおりであり、流量が大きい場合には強制対流効果がきいて熱抵抗は小さくなり、逆に流量が小さくなると自然対流による熱伝達の効果がきいてほぼ一定値に近づき、その一定値は充てん油非循環時のケーブルコア表面放散熱抵抗に近い値である。

(2) 充てん油～パイプ間熱抵抗 R_{d2} 熱工学の理論によれば、円筒内の流体～円筒間の熱伝達は、流れが層流の場合、発達した流れでは Nusselt 数は 4.36 の一定値となることが知られているが、これを油の熱

第 2 図 境界熱抵抗の流量特性

Fig. 2. Film thermal resistivity versus oil flow.

伝導率 $0.125 \times 10^{-2} W/^{\circ}Ccm$ を考慮して、熱抵抗に換算しなおすと $60^{\circ}Ccm/W$ 近くにもなる。

一方、乱流の場合には、Maltinelli 氏らの理論的考察があり、最も一般的であるが複雑である。Prandtl 数 Pr が 200 以上の場合、次式が有名である。⁽¹⁴⁾

$$Nu = 0.023 Re^{0.875} Pr^{0.25} \dots \dots \dots (8)$$

したがって、長距離線路における実験的検討を行なって定式化することが必要のように思われる。ここでは実験で得られた実測値を参考にして、第 1 表に記した数値を用いることとした。なお、この熱抵抗は次の段の土じょう熱抵抗に比較してかなり小さく、多少の相違があっても計算に大きな影響を与えるものとは思われない。

(3) 絶縁体内熱流の変わりに伴う絶縁体熱抵抗の増大効果 充てん油循環に伴う絶縁体内熱量の変わり現象から、(2)式で計算される絶縁体熱抵抗(これは均一に半径方向に熱が流れると仮定して導出されたもの)を再評価することが提案されているが、⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 実験で得られたシース温度を半径方向に調べてみると、測定誤差に含めてもよい程度のわずかな温度差しかなく、従来の式をそのまま採用してもよい程度に思われるので、ここでは無視することとした。

(4) 土じょう熱容量 C_{θ} 第 1 図の等価回路では絶縁体と同様に T 形回路で模擬しているが、一般に土じょうの熱容量はきわめて大きく、熱時定数も数十時間となるので、過渡温度上昇にはそれほど大きな影響を与えるようには思われない。しかもこの熱時定数 τ は、熱拡散率 a ($a/1 = \text{密度} \times \text{比熱} \times \text{熱抵抗}$) に比例するし、土じょう中の水分含有量が 10% 以上ならば、ほとんど一定であるという Sandy Soil に対する実験結果も報告されている⁽⁹⁾ので、直埋部については、次式から求めることとした。

$$R_{\theta} C_{\theta} = \tau \text{ 熱時定数(一定)} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 R_{θ} は土じょう部の熱抵抗であり、 τ は実測値を用いることとし、第 1 表のように 500kV ケーブルには 45 時間一定とした。275kV ケーブルでは、同種の実験結果では約 66 時間と測定されており、この値を用いることとした。

第 3 図 熱的近似等価回路

Fig. 3. Simplified thermal equivalent circuit.

〈3・2〉 基本方程式の導出 第1図の回路をそのまま解析するのは非常に煩雑なため、実用上許せる範囲で第3図のように簡単化することとした。これは絶縁体の熱容量を導体とシースに π 形に分配する考え方を応用して導き出すことができる。⁽¹⁰⁾ ただし、各記号は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_i + R_s + R_{d1} \\ R_2 &= R_{d2} \\ R_3 &= \frac{1}{2} R_o + R_p \\ R_4 &= \frac{1}{2} R_o \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= C_c + p C_i \\ C_2 &= (1-p) C_i + C_s + C_o \\ C_3 &= C_p \\ C_4 &= C_o \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$p = \frac{1}{2 \ln(R/r)} \frac{1}{(R/r)^2 - 1} \dots\dots\dots (12)$$

r, R は導体外径及び絶縁体外径を示す。

これは一相しか考えていない等価回路であるが、三相分考えれば、 T_c から T_o までの回路がさらに二つ並列されていると考えればよく、第1表にはこれも考えて計算されている。また軸方向にもこの回路がたくさん並んでいるものと考えればよい。

さて、負荷電流が第4図のように急変した場合を考えて発生熱量の変化分を次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} W_c &= W_{c1} - W_{c0} \\ W_s &= W_{s1} - W_{s0} \\ W_p &= W_{p1} - W_{p0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

1 は電流 i_1 , 0 は i_0 による発生熱量を示す。

充てん油の流量を Q , 比熱を C , 密度を ρ とすれば、他相の影響も考慮して次式が成立する。ただし、導体などから発生した熱量は、油を通してのみ軸方向に移動するものとし、導体、パイプなどでは軸方向に

第4図 電流の変化図

Fig. 4. Electric current used in calculation.

は移動せず、半径方向にのみ移動すると仮定する。

$$\left. \begin{aligned} C_1 R_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} + T_c &= T_o + R_1 W_c + R_{d1} W_s \\ C_2 R_2 \frac{\partial T_o}{\partial t} + \rho C Q R_2 \frac{\partial T_o}{\partial x} + \left(1 + 3 \frac{R_2}{R_1}\right) T_o \\ &= T_p + 3 \frac{R_2}{R_1} (R_i W_s + T_c) \\ C_3 R_3 \frac{\partial T_p}{\partial t} + \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) T_p &= W_p R_3 \\ &+ \frac{R_3}{R_2} T_o + T_e \\ C_4 R_4 \frac{\partial T_e}{\partial t} + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) T_e &= \frac{R_4}{R_3} T_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 T_c, T_o, T_p, T_e は初期条件からの上昇分を示す。すなわち、*印を初期値とすれば次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} T_c &= T_{c1} - T_{c0}^*, \quad T_o = T_{o1} - T_{o0}^* \\ T_p &= T_{p1} - T_{p0}^*, \quad T_e = T_{e1} - T_{e0}^* \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

この場合、初期値とは前述したように、 i_0 が長時間流れていて、各部の温度は飽和していたものとし、次式で与えられる。これは(14)式から時間変化がないものとして $\partial T / \partial t = 0$ と考え、さらに誘電体損を加味して導出することができる。

$$\left. \begin{aligned} T_{c0}^* &= T_{o0}^* + R_{d1} W_o + R_i \left(W_{c0} + \frac{1}{2} W_{d0} \right) \\ T_{o0}^* &= \{ 3 R W_o + W_{p0} (R_3 + R_4) \} \\ &\quad \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{x}{\rho C Q R} \right) \right\} \\ &\quad + (T_{o0} - T_{e0}) \exp \left(\frac{x}{\rho C Q R} \right) + T_{e0} \\ T_{p0}^* &= (3 W_o + W_{p0}) R_3 \\ &\quad - \frac{R_3}{R} \{ 3 R W_o + W_{p0} (R_3 + R_4) \} \\ &\quad - (T_{o0} - T_{e0}) \exp \left(- \frac{x}{\rho C Q R} \right) + T_{e0}^* \\ T_{e0}^* &= (3 W_o + W_{p0}) R_4 \\ &\quad - \frac{R_4}{R} \{ 3 R W_o + W_{p0} (R_3 + R_4) \} \\ &\quad - (T_{o0} - T_{e0}) \exp \left(- \frac{x}{\rho C Q R} \right) + T_{e0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 T_{e0} は基底温度を示し、 W_o は次式で計算される。

$$W_o = W_{d0} + W_{e0} + W_{s0} \dots\dots\dots (17)$$

〈3・3〉 初期条件と境界条件の設定 初期条件は

任意の x に対して次式で与えられる。

$$T_c = T_0 = T_p = T_e = 0 \dots\dots\dots (18)$$

置境界条件として、任意の t に対して、 $x=0$ において次式が成立しなければならない。なお、以下においては線路こう長 L によって正規化して取り扱うこととする。したがって、流量 Q も L で割った値 (cm^2/hr の単位) となる。

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 0 \\ T_c &= (W_c R_1 + R_{d1} W_s) (1 - e^{-(t/C_1 R_1)}) \\ T_p &= \frac{W_p}{C_3} \frac{1}{\beta - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \\ &\quad + \frac{\gamma}{\beta - \alpha} \left\{ \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) - \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \right\} \\ T_e &= \frac{\overline{W_p R_3}}{\beta - \alpha} \{ \alpha (1 - e^{-\alpha t}) - \beta (-e^{-\beta t}) \} \\ &\quad + \frac{\gamma}{\beta - \alpha} C_3 R_3 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + \frac{R_2 + R_3}{R_2} T_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{a - \sqrt{a^2 - 4b}}{2}, \quad \beta = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \\ \gamma &= \frac{(R_3 + R_4) W_p}{C_3 R_3 C_4 R_4}, \quad a = \frac{R_2 + R_3}{C_3 R_2 R_3} + \frac{R_3 + R_4}{C_4 R_4 R_3} \\ b &= \frac{R}{C_4 R_4 C_3 R_3 R_2}, \quad R = R_2 + R_3 + R_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

〈3.4〉 デジタル計算機による解法 上述の 4 元連立偏微分方程式を解くために、差分法を適用することとし、差分 $\Delta x, \Delta t$ として、計算時間も考慮してそれぞれ 5/1,000, 2/100 とした。 $(x$ については全長を 200 等分、時間 t については 1.2 分としたことを意味する) なお Δx については 1/1,000 Δt については 1/100 について計算し、error は 0.1% 以内に入っていることを確認した。

計算に使用したプログラムのフローチャートを第 5 図に示す。なお、本計算に使用した電子計算機は IBM の System 360/75 である。

〈3.5〉 土じょう熱抵抗可変の場合 一般に、ケーブルルートに沿っての土じょう熱抵抗は一定ではない。非循環時は、最も熱抵抗の高いところで送電容量は計算されているが、強制冷却でもこのようにルート全域が最高熱抵抗として計算するのは不経済であり、ルート条件にあった計算が望まれる。この場合の過負荷電流計算法は、前述した基本式の定数を変えたとともに、初期条件を次のように変えるだけでよい。つまり、第 i 区間 ($x_{i+1} \geq x \geq x_i$) の温度を計算するには

第 5 図 計算プログラムのフローチャート

Fig. 5. Flow chart of computing program.

(16) 式中の T_{00}^* の中の T_{00} に T_{00}^* の x に t_i を入れて求められた値を代入するとともに、 x にはすべて $x-x_i$ を用いられよい。

4. 計算結果と考察

〈4.1〉 過渡温度上昇曲線 500 kV, 1,400 mm²

第 6 図 POF ケーブルの充てん油の過渡温度上昇—計算値と実測値の比較—

Fig. 6. Transient temperature rise of POF cable.—Comparison of calculated results with experimental data.—

第 7 図 モデルケーブル線路における最高導体温度点の過渡温度変化

Fig. 7. Transient temperature rise of hottest spot in model cable route.

POF ケーブルについて、油量 4l/s で電流を 0 から 1,600 A へ急変した場合の過渡温度上昇を計算した結果を第 6 図に記す。同図には実測値も示されており、途中の $x=0.6L$ でも、また終端の $x=L$ においても計算値と実測値はきわめてよく一致して* いることがわかる。これは充てん油の温度上昇であり、導体温度が測定されていないので、その比較はできないが、油温と導体温度の間の関係を考えれば、導体温度も一致するものと考えられる。

第 7 図には、第 8 図のようなケーブルに沿って、熱抵抗の異なる 275kV モデルケーブル線路を対象とした場合の最高温度点の過渡

温度上昇曲線が示されている。後述するように実線路にあつては土じょう熱抵抗がルートに沿って均一ではないため、温度上昇も終端点で最高にはならない。そこで、同図には最高点における温度上昇を記した。電流が大きくなるにつれ温度上昇のこう配も急になるのは自明である。

〈4.2〉 長さ方向の温度分布

第 8 図には上述した線路のルートに沿っての温度分布が示されている。最高温度点は土じょう熱抵抗が比較的高い値が続いているところで、しかも冷却器から遠いところになっている。従来から長さ方向に熱特性が不均一な線路において、強制冷却を実施した場合、長さ方向に比較的一様な温度分布になるとして、冷媒出口の温度を最高温度点とみなして許容電流を算出しているようであるがこの考え方は危険であることが指摘される。また逆に前掲の 275kV モデル線路について、ルートに沿って最高の土じょう熱抵抗がルートに均一に分布していると仮定して許容電流を計算してみると、油量が 0.51 cm²/hr で 460 A、2.04 cm²/hr で 463 A となり、本計算結果（不均一のままとして計算）の値 610 A、650 A と比較して、かなり低い値となる。

〈4.3〉 過負荷許容電流と通電時間の関係

前節に示したケーブルルートの最高温度点の過渡温度上昇曲線から、過負荷許容温度に達するまでの時間を求めれば、その電流を通電した場合の許容通電時間が得られる。過負荷許容温度としては、従来から認められているように、導体温度で 95°C をここでは採用するが強制冷却下にあるケーブルであれば、100°C 程度を用

流量 $Q: 0.51 \text{ cm}^2/\text{hr}$ の場合
破線: $i_1=850 \text{ A}$ 負荷増大後、3 時間 実線: $i_2=610 \text{ A}$ 負荷増大直前矢印は冷媒の循環方向を示す。下の数字は外部熱抵抗 ($^{\circ}\text{Ccm}/\text{W}$) を示す

第 8 図 不均一ルート(モデル線路)の温度分布—3 回

線中 1 回線停止、2 回線往復循環冷却の場合—
Fig. 8. Temperature distribution of model cable route with not uniform soil properties along the route.

*: 本実測値は、東京電力が中心になって行なっている大容量地中送電技術の開発研究における、500kV ケーブル強制冷却試験で得られたデータから求めたものであり、掲載を許された関係各位に深甚な謝意を表する。

第 9 図 過負荷許容電流特性

Fig. 9. Relation between overload current and its duration.

いてもよいと思われる。

第 9 図は均一土じょう特性を有するケーブルルートに対する計算例である。

流量が大きくなると許容電流が増大するのは当然であるが、その増大率は減少する。たとえば、図から 2 cm³/h 程度の Slow circulation の場合、1,000 A (連続定格の 2 倍) 3 時間、20 cm³/hr の強制冷却下では、1,200 A (連続定格の 1.5 倍) 3 時間となる。また 7 時間程度の継続時間では、前者で 800 A、後者で 1,000 A 程度となり、それぞれ 1.6 倍、1.4 倍となる。このように倍率が低下するのは連続定格電流が流量が大きくなるにつれて増大することによるものである。

なお、95°C 程度に許容温度をとれば、よほど劣化したまたは水分を含んだケーブルでない限り、熱的不安定性に突入することはないものと思われる。⁽¹²⁾

〈4・4〉 充てん油非循環に対する現行計算式の考察

前章で示した計算プログラムを用いて、275 kV POF ケーブルの充てん油非循環時の過負荷許容電流を検討したのが第 10 図である。同図には第 2 章で記した現行の JCS の計算式を用いて計算した結果も示されている。現行は $\alpha_1 = 0.60$ と決められているが、結果は 15~20% 低めにでている。これらの差は、数時間以内のところは熱時定数 $1/\alpha_1$ の大小に、また十時間以上のところは α_2 によるものと思われる。 α_1 を 0.10~0.20 (hr⁻¹) を用いたときの過負荷許容電流~時間特性も同図に示されており、 α_1 を 0.15 hr⁻¹ 程度にすれば、比較的短時間のところは計算機による結果とよく一致することがわかる。

このように熱時定数に關係する α_1 が小さい値になるのは、POF ケーブルにあっては OF と異なり、充てん油が大量に存在することによる熱容量の著しい増大、及び超高圧級における絶縁厚の増大による熱時定

第 10 図 熱時定数 $1/\alpha_1$ に対する過負荷特性Fig. 10. Overcurrent characteristics for thermal time constant $1/\alpha_1$.

数の増大が大きく影響しているものと考えられる。すなわち、簡単化して導体から充てん油までの熱回路を R-C の一次回路と考えれば、第 1 表から明らかにように導体から充てん油までの全熱抵抗 R は 64.2 °C cm/W であり、熱容量の合計は 361.3 J/°C cm であるから、熱時定数は 6.45 hr となり、その逆数が 0.155 hr⁻¹ で、 $\alpha_1 = 0.15$ hr⁻¹ と非常によく一致してくる。したがって、 α_1 はケーブルの種類と構造によって変わるものと考えられるので、今後、導体寸法、絶縁体系の構造などから決定できる次式に改めていく必要があるように思われる。

$$\frac{1}{\alpha_1} = \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sum_{j=1}^n C_j \dots \dots \dots (21)$$

ここで、 R_i, C_i : 各部の熱抵抗、熱容量

$i, j = 1 \sim n$ は導体からケーブルコアまでの各部を示す。

5. あとがき

高油圧パイプケーブル（特に充てん油循環時）の過負荷許容電流の計算法が未だ明らかにされていず、ケーブル系統の設計、運用上一つの大きなネックとさえなりつつある現状をかんがみ、その計算法を開発することを目的として検討を進めてきた。その結果を要約すると以下のとおりである。

(1) ケーブルの過渡温度上昇計算法として従来からよく知られている熱抵抗、熱容量による熱的等価回路を、充てん油が循環する強制冷却下のケーブルについて適用し、強制冷却下のケーブルの過渡温度上昇を

計算するプログラムを開発した。

(2) プログラム作成にあたり、各部の熱抵抗について、検討を加えケーブル鉄心油間の境界熱抵抗の算出に対しては、自然対流熱伝達を強制対流効果を加味した式を用いることを提案した。またケーブルルートに沿って土じょうの熱放散条件が変わった場合まで計算できるようにプログラムを拡張するとともに、計算値が実測値とよく一致することを示した。

(3) このプログラムによる計算結果を用いて、最高導体温度が過負荷許容温度に達する時間と電流の関係を求め、過負荷許容電流とその継続時間を明らかにした。許容電流は流量を増大すると大きくなるが、連続定電流格に対する比は小さくなる傾向にある。

(4) このプログラムを用いて、充てん油非循環時の過負荷許容電流も算出した。その結果は、従来から用いられている OF ケーブルの過負荷許容電流計算式 (JCS-168 B 号) と一致しなかった。この主因は、JCS の式の熱時定数に一定値を入れることにあることが判明し、POF ケーブルのように絶縁油を多量に含むケーブルにあっては、熱時定数をもっと大きくとるべきこと (このほうが経済的である) がわかった。今後この熱時定数は、ケーブル構造から決められるべきであると考え、その近似的な計算式を提案した。

なお、付属品についても同様な考慮を払って最終的な過負荷許容電流を決定すべきであることはいうまでもないが、最近、付属品の低熱抵抗化が各所で検討されており、付属品部で許容電流が制限されるようには思われない。特に付属品部の絶縁厚はケーブル部より

も大きく、油も多量に存在するところから、この部分の熱時定数はケーブル部よりもさらに大きく、したがって、急しゅんな電流変化に対してゆっくりと温度上昇していくものと考えられる。

最後に本研究の遂行上、数々のご便宜をはかって頂いた東京電力(株)技術開発研究所、渡辺達雄専門職ならびに、東電学園 氏原琢治教授に深甚な敬意と謝意を表します。また電力中央研究所 有働龍夫副所長、中島隆雄電力第三部当任、坂本雄吉電線路研究室長に厚くお礼を申し上げます。

(昭和 48 年 6 月 29 日受付, 同 49 年 2 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 日本電線工業会: 電力ケーブルの許容電流 (昭和42年7月制定)
- (2) J. D. Endacott, et al.: CIGRE Report 21-03 (1970)
- (3) J. H. Neher: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-83, 2, 102 (1964)
- (4) 深川・坂本: 電研技 I 研依頼報告 No. 72553 (1973-2)
- (5) 日本機械学会編: 伝熱工学資料 p. 5~41
- (6) Mc Adams: Heat Transfer p. 165 及び p. 202 (1942) (Mc Graw-Hill)
- (7) 南井・丸田, 他: 昭45年電気四学会連大 No. 890
- (8) 小島・三井, 他: 昭45年電気四学会連大 No. 892
- (9) 深川・今城: 昭47年電気四学会連大 No. 847
- (10) F. C. Van Wormer: Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs 74, 4, 277 (1955)
- (11) 深川・神永: 電研技 I 研報告 No. 72044 (1972-9)
- (12) 深川・今城: 電研技 I 研報告 No. 70074 (1971-2)
- (13) J. Notaro & D. J. Webster: IEEE Trans. 70-TP 518-PWR 1225 (1970-7)
- (14) J. Notaro & D. J. Webster: EEI Project RP 78-5 Final Report (1969-3)
- (15) C. W. Rice: Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. pt I 42, 6, p. 653 (1923-6)